

局部防风措施对大坝施工的防护作用数值模拟研究

郭利豪, 李国栋, 李莹慧

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 在中国西南高山峡谷中,大型水电工程的施工往往会受到大风的干扰。超过7级的大风会影响缆式起重机的运行及作业面施工,无法保证混凝土的连续浇筑,不仅影响施工进度也严重影响施工质量。结合白鹤滩水电站在无防风措施下会受到大风影响的情况,利用三维计算流体力学方法,对增设了局部防风措施的大坝施工全周期风场环境进行数值模拟,得到坝体区域及高、低线供料平台处的风场分布,分析了所增设的局部防风措施的防风效果。研究表明:在增设局部防风措施后,大坝施工区域整体风速有所减小,在大坝施工高程较低时效果较为明显,对施工区域能够提供有效的防护,高程较高时则防护效果减弱。研究成果为工程的安全施工以及下一步防护措施的提出提供了依据。

关键词: 大坝施工;局部防风措施;风场特性;防风效果;数值模拟

中图分类号:TV314

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)06-0155-08

Numerical simulation study on the protective effect of partial windproof measures on dam construction

GUO Lihao, LI Guodong, LI Yinghui

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In the alpine valleys of southwest China, the construction of some large hydropower projects was disturbed by strong winds. The winds exceeding level 7 will affect the operation of the cable crane and the construction of the working surface, and the continuous concrete pouring cannot be guaranteed, which not only affects the construction progress but also seriously affects the construction quality. Considering that Baihetan Hydropower Station will be affected by strong winds without windproof measures, this paper used the three-dimensional computational fluid dynamics method to numerically simulate the wind velocity distribution of the entire dam construction period with the addition of partial windproof measures. The characteristics of the wind field at the dam area and the high and low line feeding platforms were obtained, and the windproof effect of partial windproof measures was analyzed. The study shows that the overall wind speed in the dam construction area decreased with the partial wind protection measures, and the effect was more obvious at the lower elevation of the dam crest, which provided effective protection for the construction area, but the protection effect was weaker at higher elevation. The research results can provide a strong basis for the safe construction and further windproof measures of the project.

Key words: dam construction; partial windproof measure; wind field characteristics; windproof effect; numerical simulation

1 研究背景

众所周知,设计不当的建筑物结构在较强的风荷载作用下容易发生损坏,尤其如跨度较大的桥梁、

高层建筑物等细长型结构。但是大风环境往往也会对施工安全及施工质量造成影响。在中国西南地区的高山峡谷中,有的地方在冬、春季往往会出现持续大风天气,如位于金沙江的白鹤滩水电站坝址处,实

收稿日期:2020-08-20; 修回日期:2020-11-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51579206); 陕西水利科技计划项目(2017slkj-17)

作者简介:郭利豪(1995-),男,河北张家口人,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学方面研究。

通讯作者:李国栋(1967-),男,陕西榆林人,博士,教授,博士生导师,主要从事计算流体力学和多相流体力学研究。

测7级以上大风天数占全年总天数的66%,而在10-次年4月的冬、春季这一占比高达84%。且有研究表明该大坝的修建过程中,大风环境会危及缆机等大型设备的运行及施工人员的安全^[1]。这不仅对工程的建设进度造成了影响,同时也会降低混凝土的浇筑质量(为了保证大坝不同仓面之间的连续性以及大坝的完整性,在混凝土浇筑时要保持20h甚至30h的连续施工)。因此本文提出局部防风措施,并对其进行模拟研究,这对顺利、安全、高质量、按时完成大坝浇筑施工具有相当重要的意义。

目前现有关于风环境的研究主要集中在细长建筑物如桥梁、高层建筑物等受风力影响较大的工程项目,且对这两类项目的研究多集中于风对建筑物设计本身的安全影响,并未涉及到风对施工过程中影响的研究,但这也是不可忽略的对工程质量影响巨大的一面。同时关于风环境的研究方法主要有现场实测^[2-4]、风洞试验^[5-7]和数值模拟^[8-9]计算等,由于数值模拟方法具有强大的灵活性和经济性,近年来被越来越多的学者用于各类科学研究,其中包括关于风场的研究。如2018年吴联活等^[10]利用FLUENT对山地地形风场特性进行数值模拟,得到复杂山区地形桥址区风场的空间分布特性;张玥等^[11]以晋陕大峡谷地带禹门口黄河大桥为研究对象,总结了各项异性复杂地形下桥峡谷地带风场分布特性;薛亚飞等^[12]以拟建的山西临猗黄河大桥为工程背景,采用FLUENT软件进行桥位地形风场数值模拟,研究表明风从正北方吹时,各监测点处平均风速随着高度增加而增大;李正良等^[13]对山顶平均风加速比在不同山体坡度的情况下进行了数值模拟研究,并且将模拟结果与风洞试验结果进行对比,结果表明通过数值模拟平均风的结果更为准确;2020年Peterson等^[14]利用加速度数据对哈丹格尔大桥的风荷载进行研究估算;2019年Yu等^[15]研究了深冲峡谷桥梁、桥面栈道的风场特性,确定了局部地形对平均风特征的影响,导出了湍流强度和长度沿桥式天桥的变化规律;李永乐等^[16-17]选取桥位处的山区复杂地形,对该处的风场特性进行数值模拟研究,研究发现风速随高度的变化规律不同于常规的对数律以及指数律模型;2019年毛璐璐等^[18]基于ANSYS/FLUENT软件研究超高层建筑抗风形体优化,认为圆形截面负风压量值较小,且具有良好的抗风性能;Aristodemou等^[19]运用大涡模拟方法对高层建筑周围空气流动对污染扩散的影响进行模拟研究,并辅以风洞试验加以验证,同时以此来优化建筑分布;

Elshaer等^[20]在大涡模拟和人工神经网络替代模型的基础上,提出了建筑物转角启动优化程序降低风荷载;2000年Kim等^[21]采用实测与模拟相结合的方法,对山区地形的风场特性进行研究,发现实测与模拟这两种研究方法的结果较为接近;郭立博等^[22]针对横风作用下坝体与心墙填筑高度差的防风结构进行研究,发现增加防风结构高差和减小设置距离有利于心墙处近地面风速的消减;刘翊竣等^[23]以洪泽湖为研究对象,利用数值模拟的方法分析了风场和吞吐流对场流的影响,研究发现风速会改变场流强度而不会改变其结构,同时还会影响该湖泊的出流能力。由以上文献可以看出,数值模拟方法在风环境研究中的实用性和准确性均较强。由于本文所选的实例工程施工范围大、关注点较多,三维数值模拟的方法同样适用于本研究,所以本文用数值模拟方法对增设了局部防风措施的白鹤滩水电站施工周期内坝顶浇筑到不同高程时,坝体区域内高、低线供料平台各工作面处的风力特性进行了模拟,并对该方案的防风效果进行了分析。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

白鹤滩水电站枢纽工程位于金沙江峡谷,地处四川省宁南县和云南省巧家县交界。拦河大坝为椭圆线型混凝土双曲拱坝,大坝共分为31个坝段,最大坝高289.0m,坝顶高程834.0m。大坝共设置缆机7台,采用高、低双线布置方案。高线3台,轨道平台高程905m,低线4台,轨道平台高程890m,缆机的工作区域均在坝顶上方10m。低线缆机供料平台布置高程768m,高线供料平台布置高程834m。工程建成后的整体效果图见图1。



图1 白鹤滩水电站整体效果图

2.2 数据来源

2.2.1 气象数据来源 本文对大坝附近的新田自动气象观测站2012-2014年的数据进行统计分析,

7级及其以上大风每年平均241 d,其中8级大风81 d,9级大风58 d,10级大风23 d,11级大风5 d。可以看出大坝区域风力主要以7、8、9级为主,计算时采用最不利条件,即9级。

2.2.2 模型验证 数值模型在应用前,均需要进行模型验证,以确保模拟结果的准确与可靠。同时由于本研究项目白鹤滩水电站工程的地形实测数据较少,所以采用与本坝址区域地形相似的风洞试验^[24]来进行验证计算。该风洞试验计算区域为6.3 m(长)×1.4 m(宽)×1.4 m(高),山体地形模型在靠近试验段入口的2.1 m处,模型比例为1:1000。模型网格划分采用结构化网格,网格总数为364×10⁴个。入口边界采用风速入流,平均风速为15 m/s,出口按大气压给定。

数值模拟采用余弦形山体模型,山体形状及风速测点布置如图2所示,其轮廓形状表达式如下:

$$z(x,y) = H \cos^2\left(\frac{\pi(x^2 + y^2)^{1/2}}{D}\right) \quad (1)$$

$$((x^2 + y^2)^{1/2} \leq \frac{D}{2})$$

式中: H 为山体高度,取值为 $H = 150 \text{ mm}$; D 为山体底部直径, $D = 600 \text{ mm}$ 。

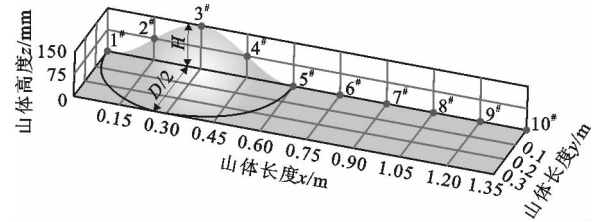


图2 数值模型山体形状及风速测点布置

选取山体顺风向3个不同断面的3个测点,即1#、3#、5#测点(图2),模拟计算出该3个测点在不同高度处的风速与风洞试验结果进行对比,如图3所示。

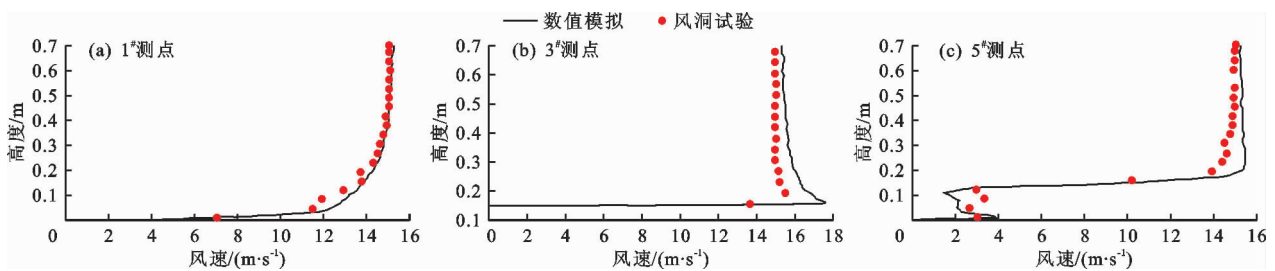


图3 3个不同断面测点风速数值模拟结果与风洞试验结果对比

由图3可以看出,数值模拟结果与风洞试验结果非常接近。所选3个断面测点的相对误差最大不超过2.46%。因此,该数值模型可以准确地模拟峡谷地形的风场分布规律。

2.3 研究方法

2.3.1 数值模拟方法 肖仪清等^[25]对山区峡谷的风场特性采用不同的湍流模型进行模拟研究,发现Realizable湍流模型对于山区峡谷这种复杂地形的模拟效果较好,因此本文采用该湍流模型对峡谷中的白鹤滩水电站坝址区域进行模拟。有限体积法被用于进行控制方程的离散,SIMPLEC算法被用于流场的求解。计算达到收敛的条件是:所有变量的无量纲残差迭代至 10^{-3} 以下稳定不变化或者呈现一个稳定的相同趋势的小幅度波动状态;监测点处流场特性不再出现显著变化;出、入流边界流量之差小于 10^{-3} 。在满足这些条件的情况下被认为此时流场模拟是稳定的。

2.3.2 模型构建与网格划分 根据工程概况以及机械施工设备的布置,数值模型的长度范围为大坝

上游4 000 m至下游6 000 m,其高度范围为从河道高程(约560 m)至高程5 000 m,河岸两侧的模拟宽度范围为8 000 m。并根据实际工程布置,在地形模型中加入了高、低线供料平台、缆机主副塔等局部地形特征。整体模型及局部重点区域地形特征如图4、5所示。

考虑到计算区域地形复杂且范围较大,同时又兼顾模拟计算的速度和精度,本文采用渐变的网格划分方案,以1.2 m的渐变速率向外扩大,最大网格尺寸为100 m,不同工况下,网格总数在 $358 \times 10^4 \sim 413 \times 10^4$ 之间。网格划分情况如图6所示。

2.3.3 边界条件设置 入口按速度边界给定,采用均匀风速入流,按照最不利情况风速取20.8 m/s。出口采用压力出口边界条件按大气压给定。地表和两侧按无滑移边界给定(wall),顶面采用对称边界条件(symmetry)。其他具体边界条件设置如图7所示,模拟风向如图8所示。

2.3.4 计算工况及局部防风措施布置

(1)计算工况。气象观测站观察数据显示,坝

区常年以7~9级风为主,风向大多数为沿着河道方向的北风或者偏北风。为了便于计算同时又保证不会影响结果的准确性,本文仅考虑垂直于入口边界的正北风向(图8),模拟入口风速取较不利情况的20.8 m/s(即为9级风)。在分析结果时,采用风力替代风速,以满足实际工程需求。本文在针对施加局部防风措施后的大坝进行施工全过程的模拟,选取5个典型坝顶浇筑高程,分别为600、650、700、750和800 m。

(2)局部防风措施。由于大坝在施工过程中,坝体和高、低线供料平台处是受风场影响较大的区域,因此局部防风措施的实施也是围绕该重点区域。通过对计算模拟在防风网高度、防风网安装位置、挡风率、组合布置方式4方面进行不断调试,最终提出了以下防风效果较好的措施:

①下游围堰上设置20 m高的挡风网,至高程648 m,该处挡风网的建立将有利于低坝高时的施工。

②左岸在890 m平台、854 m平台、834 m平台边缘以及坝肩下游侧设置20 m高挡风网,以对高、低线供料平台形成防护。

③右岸副塔上、下游设置20 m高挡风网,间隔300 m,可为副塔区提供防护。

挡风网的挡风率设为0.5,按4 m透风、4 m不透风进行概化处理。具体防风网布置如图9、10所示。

3 结果与分析

模拟结果主要分为4部分:第1部分为大坝浇

筑到不同高程处沿河道纵向风场分布云图,旨在展示增设局部防风措施后坝体区域、消力池内的风力特性;第2部分为坝顶上方10 m处的风速分布,该处的风场主要影响的是大坝的连续浇筑,结合第1、2部分可对坝体区域进行立体性的分析;第3部分为高、低线供料平台处的风速分布,对该处的关注主要原因是高、低线供料平台担负着为大坝浇筑提供混凝土的重要功能;第4部分为大坝不同浇筑高程时,大坝坝顶左岸、中部和右岸3个位置上方的低风速区范围变化,是对整体坝址区域施工安全环境的再次确认。

3.1 大坝浇筑至不同高程处河道纵向风场分布

图11为大坝浇筑至不同高程时沿河道纵剖面($X=2000\text{ m}$)的风速云图,各级风力所对应的风速见表1。

由图11可以看出,在坝顶高程为600、650 m时,坝顶上方存在较大范围的低风速区;高程升高至700 m时,坝顶上方低风速区范围大幅度减小,但仍可以满足施工要求;随着坝体继续浇筑升高,低风速区范围进一步减小,已不能满足安全施工的要求。同时由图11也可以看出,增设挡风网后,在坝高650 m以下,消力池内风场分布紊乱,主要原因是大坝高度较低,未能形成有规律的风场回流,但风力总体均在6级以下。

3.2 坝顶上方风场分布

图12为增设局部防风措施的条件下,坝顶不同浇筑高程时坝顶上方10 m处的风速分布云图。

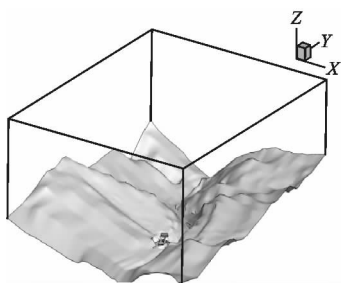


图4 整体几何模型

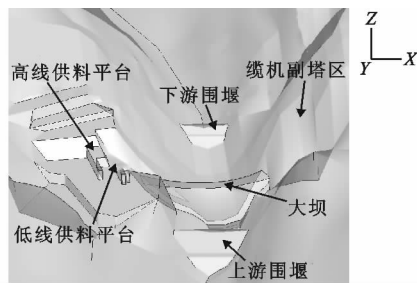


图5 模型局部重点区域地形特征

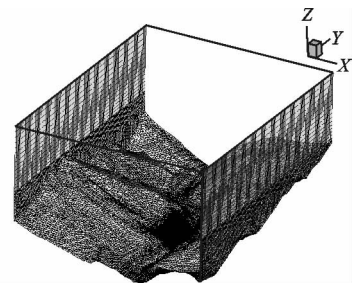


图6 整体模型网格划分示意图

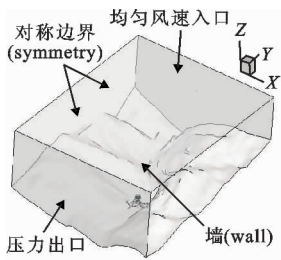


图7 数值模型边界条件设置

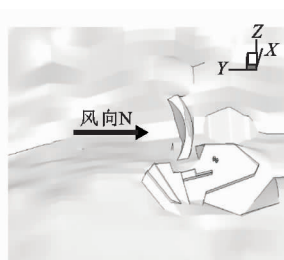


图8 数值模型模拟风向

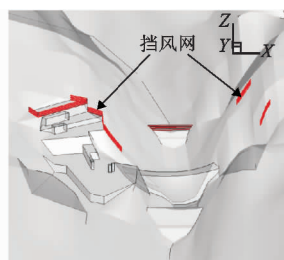


图9 坝址区域的整体防风网布置

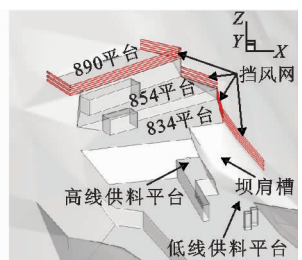
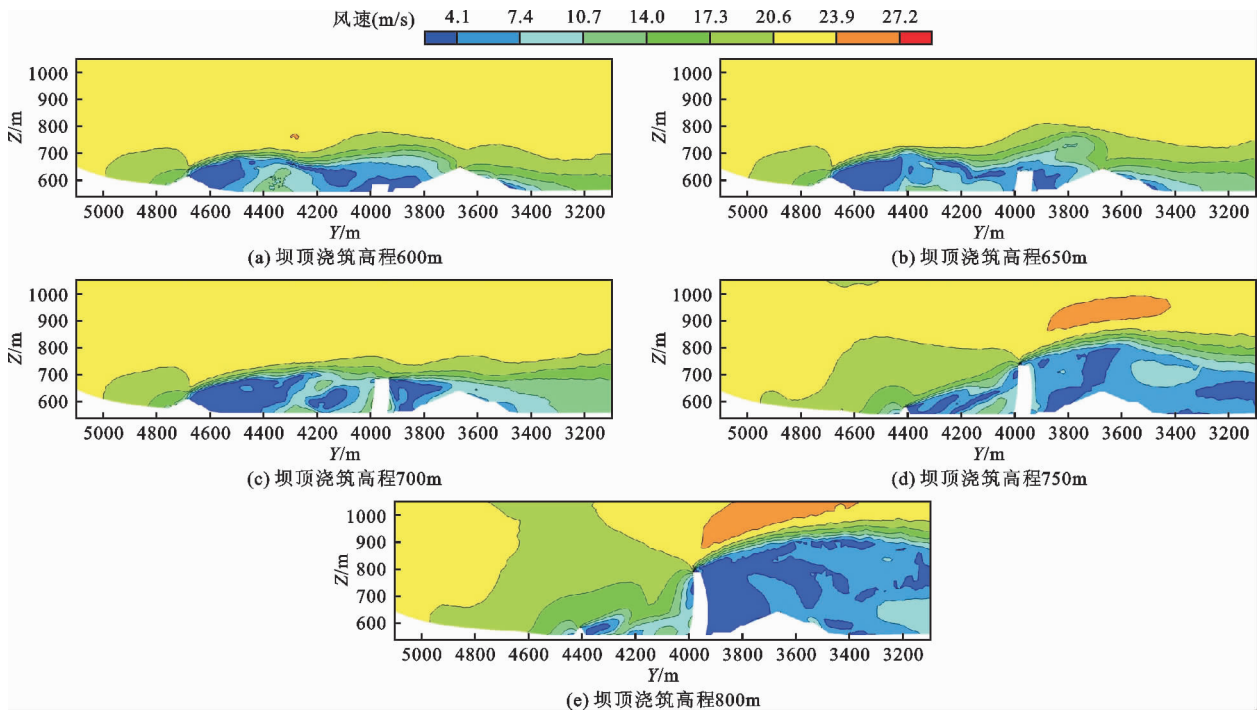


图10 左岸局部防风网布置



注:图中等值线按风力等级划分,由蓝色至红色依次为4级以下、4级、5级、6级、7级、8级、9级、10级、10级以上,由于风速等值线只能按等间隔划分,所以与规范中风力所对应的风速分界值略有差异,但不影响对风场的分析,下同。

图 11 大坝浇筑至不同高程时沿河道纵剖面风速分布云图(X = 2 000 m)

表 1 各级风力所对应的风速

| 风力等级 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 风速/(m·s ⁻¹) | 0.0~0.2 | 0.3~1.5 | 1.6~3.3 | 3.4~5.4 | 5.5~7.9 | 8.0~10.7 | 10.8~13.8 | 13.9~17.1 | 17.2~20.7 | 20.8~24.4 | 24.5~28.4 | 28.5~32.6 |

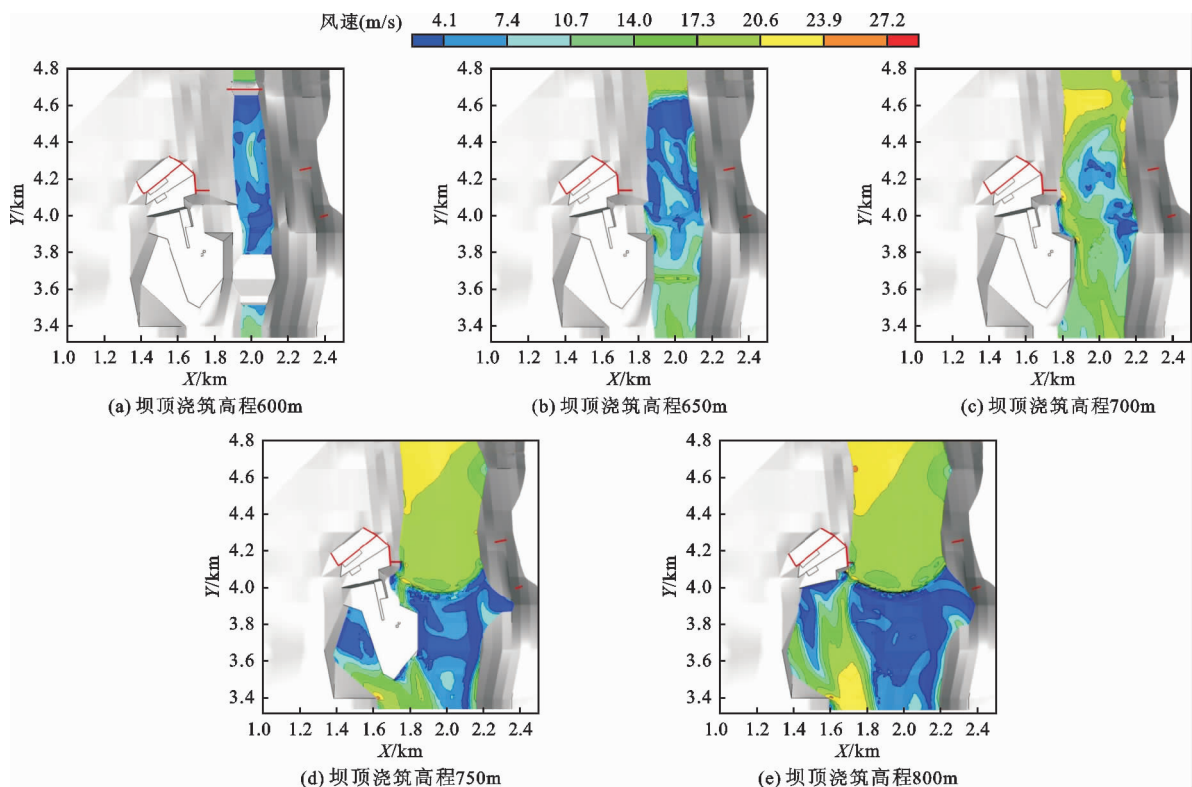


图 12 坝顶不同浇筑高程时坝顶上方 10 m 处的风速分布云图

由图 12 可以看出,在坝高为 600、650 m 时,整个施工区域均为低风速区,是一种较为理想的施工环境;当坝顶高程达到 700 m 时,区域内流场较乱,呈左岸风速大、右岸风速小的分布状况,该种情况下只有部分区域可满足施工要求;当坝顶高程超过 700 m 时,风场又进入稳定分布的状态,以坝身为分界线,下游为较大风速区域,上游为较低风速区域,虽然风速分布比较理想,但结合纵剖面图(图 11)可

知,低风速区高度范围较小,未能满足坝面浇筑的风速条件,造成此种情形的原因是来风遇到坝体阻挡而抬升,未贴坝顶通过,形成了很小范围的低风速区,不能满足施工要求。

3.3 低、高线供料平台处风场分布

图 13 为增设局部防风措施的条件下,坝顶不同浇筑高程时,低、高线供料平台上方 10 m 处的风速分布云图。

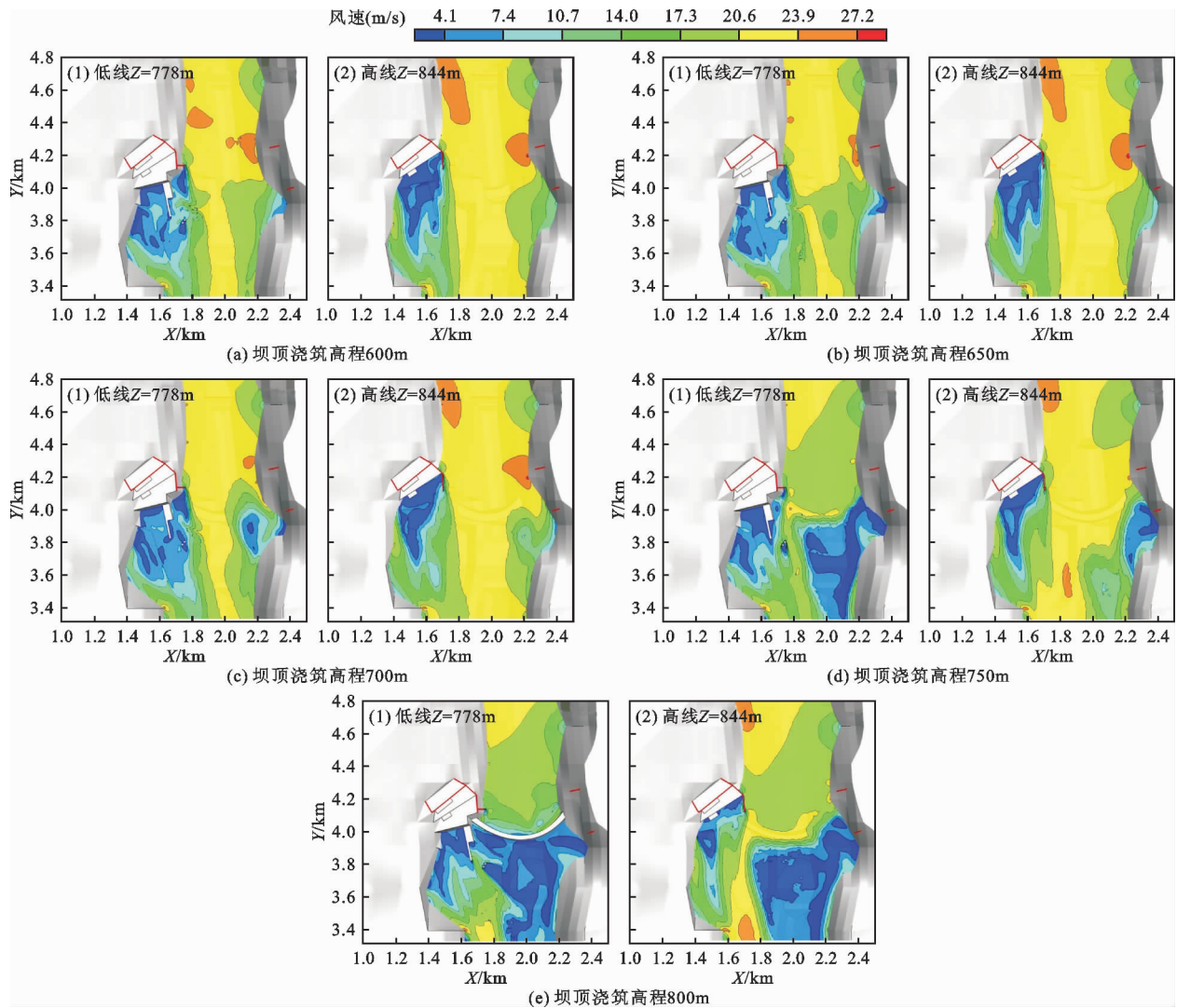


图 13 坝顶不同浇筑高程时低、高线供料平台上方 10 m 处的风速分布云图

由图 13 中低线供料平台处的风场分布可以看出,在坝高为 600、650、700 m 时,整个左岸区的风力分布均较为相似,且处于安全的状态;当坝高上升至 750 m 时,大风向左岸偏移,低风速区范围减小;当坝高为 800 m 时,由于坝体较高,同样对低线供料平台形成了防护。可见在坝高超过 700 m 以后,低线供料平台可达安全要求,但其周围存在着高风带,需予以重视。

由图 13 中高线供料平台处的风场分布可以看出,风场分布较为均匀、规则,且随着坝体浇筑高度的增加呈现出低风速区逐渐减少、高风速区逐渐向内挤压的趋势。坝高不超过 700 m 时,高线供料平台处于低风速区内;坝高超过 700 m 时,该平台逐渐暴露于高风速区。该区域风场分布较为规律的原因是平台高程较高且受地形和工程设备的干扰较小。可见坝顶浇筑高程超过 700 m 时,高线供料平台

的运行安全受到威胁。

3.4 坝顶不同位置低风速区高度

图14为不同坝顶浇筑高程时坝顶左岸、大坝中部和右岸的低风速区高度。

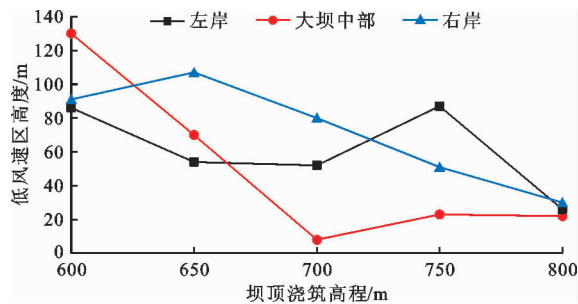


图14 不同坝顶浇筑高程时坝顶左岸、大坝中部和右岸的低风速区高度

由图14可知,当坝顶高程为600、650 m时,整个坝体上方的低风速区高度由左岸到右岸均较高,大坝中部的低风速区高度甚至可达130 m,可为施工提供足够的安全保障。大坝左岸、中部和右岸的低风速区高度整体呈现随着坝顶高程增加而减少的趋势,但坝顶高程为750 m时,左岸低风速区高度出现了增大现象,出现该种情况是因为左岸山体的防护。当坝顶高程超过750 m时,大坝中部和右岸低风速区高度大幅度下降,这对工程的施工是不利的。

4 讨论

由于局部防风措施的设置,使风场分布情况整体上较自然条件有很大改观,这种形势在坝顶高程低于700 m时表现较为明显,主要是因为局部防风措施所布设的防风网高度有限,使其仅仅在高程较低的环境下能很好地发挥效果,在更高的施工环境下则保护作用减弱。为了解决这一问题,在后续的研究中应尝试增加防风网高度,改变其布设方式来提高对工程的防护效果。

5 结论

本文探讨了为大坝安全施工而增加局部防风措施后的施工区风场特性,主要研究了白鹤滩水电站坝址区域和高、低线供料平台处的风场分布,得到主要结论如下:

(1)由于下游围堰顶部设置20 m高的挡风网,其挡风作用使得进入基坑内的风速减小,同时由于挡风网的存在,风向会发生改变而呈现上挑趋势,使得在坝顶高程较低情况下的坝顶上方低风速区高度显著增大,达到30 m以上。

(2)低线供料平台处的风力与原风力相比减小3级以上;高线供料平台处的风场分布较不规则,在近大坝侧风力较小,远侧则较大。当坝体低于700 m时,高、低线供料平台处于非常安全的状态;坝体超过700 m时,高线供料平台的运行安全受到威胁。

总而言之,局部防风措施在大坝的安全建设施工过程中有着较大的意义,在大坝较低时起到了很好的防护作用。但是当坝顶浇筑高程超过700 m时,各施工点位均会受到不同程度的威胁,同时本方案经过反复优化已达到了较优的防风效果,若要对高坝施工进行更好的防护,则可以考虑全断面防风等其他措施。

参考文献:

- [1] 李国栋,李莹慧,李珊珊. 大风环境下大坝浇筑过程中坝址区域风场变化的数值模拟研究[C]// 中国大坝工程学会. 2016 学术年会论文集, 西安: 2016.
- [2] LIU Zhao, ZHENG Chaorong, WU Yue, et al. Investigation on characteristics of thousand-meter height wind profiles at non-tropical cyclone prone areas based on field measurement[J]. Building and Environment, 2018, 130: 62-73.
- [3] FLAY R G J, KING A B, REVELL M, et al. Wind speed measurements and predictions over Belmont Hill, Wellington, New Zealand[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 195: 104018.
- [4] JING Hongmiao, LIAO Haili, MA Cunming, et al. Field measurement study of wind characteristics at different measuring positions in a mountainous valley[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 112: 109991.
- [5] MUGGIASCA S, BAYATI I, GIAPPINO S, et al. Wind-induced response of light and slender arched structures in twin arrangement: Wind tunnel tests and full-scale monitoring[J]. Engineering Structures, 2019, 190: 262-275.
- [6] XU Haijiang, DENG Hongzhou, HU Xiaoyi, et al. Wind tunnel test on aerodynamic coefficients of multi-bundled conductors under skew winds[J]. Journal of Fluids Structures, 2019, 91: 102702.
- [7] ZHANG Lei, DAI Yuke, SHEN Xing, et al. Research on an active pitching damper for transonic wind tunnel tests[J]. Aerospace Science Technology, 2019, 94: 105364.
- [8] CHEN Jianbing, CHEN Youwei, PENG Yongbo, et al. Stochastic harmonic function based wind field simulation and wind-induced reliability of super high-rise buildings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 133: 106264.
- [9] ZHAO Jing, WANG Jianzhou, GUO Zhenhai, et al. Multi

- step wind speed forecasting based on numerical simulations and an optimized stochastic ensemble method [J]. *Applied Energy*, 2019, 255:113833.
- [10] 吴联活, 张明金, 李永乐, 等. 复杂山区地形桥址区风特性的数值模拟[J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(5):915-922.
- [11] 张玥, 唐金旺, 周 毅, 等. 峡谷复杂地形风场空间分布特性试验研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(12):35-40+49.
- [12] 薛亚飞, 刘志文. 复杂地形桥位风场空间分布特性数值模拟[J]. *公路交通科技*, 2016, 33(5):66-72.
- [13] 李正良, 魏奇科, 黄汉杰, 等. 山地超高层建筑风致响应研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(5):43-48.
- [14] PETERSEN Ø W, ØISETH O, LOURENS E. Investigation of dynamic wind loads on a long-span suspension bridge identified from measured acceleration data [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 196:104045.
- [15] YU Chuanjin, LI Yongle, ZHANG Mingjin, et al. Wind characteristics along a bridge catwalk in a deep-cutting gorge from field measurements [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 186:94-104.
- [16] 李永乐, 蔡宪棠, 唐 康, 等. 大跨度山区桥梁桥址区风场特性数值模拟研究[C]//第十四届全国结构风工程学术会议论文集(上册), 北京, 2009.
- [17] 李永乐, 胡 朋, 蔡宪棠, 等. 紧邻高陡山体桥址区风特性数值模拟研究[J]. *空气动力学学报*, 2011, 29(6):770-776.
- [18] 毛璐璐, 韩兆龙, 周 岱, 等. 典型形体超高层建筑的风压风场与抗风优化研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(18):215-222.
- [19] ARISTODEMOU E, BOGANEGRA L M, MOTTET L, et al. How tall buildings affect turbulent air flows and dispersion of pollution within a neighbourhood [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 233:782-796.
- [20] ELSHAER A, BITSUAMLAK G, DAMATTY A E. Enhancing wind performance of tall buildings using corner aerodynamic optimization [J]. *Engineering Structures*, 2017, 136:133-148.
- [21] KIM H G, PATEL V C. Test of turbulence models for wind flow over terrain with separation and recirculation [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 94(1):5-21.
- [22] 郭立博, 何建新, 杨海华. 横风作用下坝体与心墙填筑高差的防风结构研究[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(5):89-94.
- [23] 刘翊竣, 徐国宾. 风场和吞吐流对洪泽湖流场的影响分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(2):174-178+184.
- [24] 李 鑫. 山地地形的近地风场特性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
- [25] 肖仪清, 李 朝, 欧进萍, 等. 复杂地形风能评估的CFD方法[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(9):30-35.

(上接第154页)

- [12] 张奋翔, 张路青, 周 剑, 等. 基于FLO-2D的西藏若如村泥石流危险性分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(5):95-102.
- [13] 涂国强, 程尊兰, 刘建康, 等. 强震后高烈度区泥石流危险性评价——以汶川地震区G213线映秀到彻底关段为例[J]. *山地学报*, 2013, 31(4):391-398.
- [14] 龚 柯, 杨 涛, 夏晨皓, 等. 基于FLO-2D的泥石流危险性评价——以四川省汶川县绵鹿镇簇头沟为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(6):134-138.
- [15] 郝红兵, 赵松江, 李胜伟, 等. 汶川地震区特大泥石流物源集中启动模式和特征[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(6):159-165+170.
- [16] 李德华, 许向宁, 吉 峰, 等. 汶川县映秀镇红椿沟特大泥石流工程防治及初步效果分析[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(2):260-268.
- [17] 唐 川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J]. *山地学报*, 2010, 28(3):341-349.
- [18] TANG Chuan, ZHU Jing, JUN Ding, et al. Catastrophic debris flows triggered by a 14 August 2010 rainfall at the epicenter of the Wenchuan earthquake [J]. *Landslides*, 2011, 8(4):485-497.
- [19] 许 强. 四川省“8.13”特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(5):596-608.
- [20] 崔 鹏, 韦方强, 何思明, 等. 5·12汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. *山地学报*, 2008, 26(3):280-282.
- [21] 陈仲超. 浅谈地质灾害治理与景观融合设计——以广东肇庆市蓝塘中石化加油站东侧山体滑坡治理设计为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2016, 27(1):95-101.